

2.2.10 インフラ保守ロボット

(1) 研究開発領域の定義

現在、日本の建設業では、少子化に起因する若年就業者数の減少が進むと共に、これに起因する熟練技術者や技能者の不足が大きな問題となっている。また、高度経済成長期に集中的に整備された膨大な社会資本が老朽化したため、インフラの維持管理・更新が急務であるが、この分野においても、同様の問題が発生している。これらの問題を解決するため、現在、ICTやロボット工学を適用した、建設機械やインフラ点検の自動化・省人化技術に関する研究開発が進められている。このように、新技術の創出ではなく、既存のロボット技術を建設分野に適用し、フィールド分野における新たな価値創出の実現を目指すものが、本研究開発領域である。

(2) キーワード

ロボット技術、ICT、RTK-GNSS (Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System)、インフラ点検、無人化施工、情報化施工、ICT土工、ドローン、建設機械、マシンコントロール、i-Construction

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

日本の産業においては、少子化に起因する若年就業者数の減少や、高齢化に起因する熟練した技術者・技能者の不足が問題となっているが、建設現場においては、この問題が顕著であり、特に、地方の土木建設工事において、その状況は深刻である¹⁾。そこで、国土交通省は、2016年を生産性革命元年と位置づけ、建設施工分野で「i-Construction」と銘打って、ICT (Information Communication Technology) 土工 (土木工事) を推進してきた^{2), 3)}。これにより、土工における20%の生産性向上を目指している。この施策をさらに進めるため、ICTならびにロボット技術を用いた建設機械の自動化に対する研究開発も進められており、この分野に対する期待も大きい⁴⁾。

一方、日本では、昭和30年代からの高度経済成長期に集中的に整備された社会資本の老朽化が現在急速に進んでおり、2012年に発生した笹子トンネル天井板落下事故に代表されるように、老朽化が重大事故につながるケースが存在する。このような事故を未然に防ぐためには、インフラの維持管理・更新の作業が急務である⁵⁾。そこで、国土交通省は、2014年7月より、日本国内の全トンネルと橋梁で一律に、5年に1度の点検を義務付けた^{6), 7)}。この点検により、2019年までに、日本国内に存在する70万橋の橋梁と、1万本のトンネル点検が実施されたが、点検コストが膨大となること、熟練点検員とそうでない点検員とのスキルの差に起因する点検精度不均一といった問題が明らかとなってきた。これらの問題を解決することが可能なロボット技術に対する期待は大きい。

以上に記した通り、インフラ点検や土木工事におけるロボット技術、センシング技術や建設機械の高度化に対し、大きな期待が寄せられている。しかしながら、工場内などのロボットと異なり、対象とするのは屋外環境であり、要求される移動、センシング、作業等において、より高度なロボット技術が求められている。

[研究開発の動向]

ICT技術を活用した建設機械の高度化について、これまで、国土交通省が主導する情報化施工戦略⁸⁾の下、ICT技術を導入した自動制御建設機械の研究開発が進められてきた。この施策は、2016年に開始されたi-Constructionと呼ばれる施策中の、ICTの全面的な活用 (ICT土工等)²⁾ に引き継がれ、「建設現場の生産性を2025年までに20%向上させる」ことを目指し、2022年現在も、この施策は継続している。このICT土工とは、ドローンなどを使った3次元測量を行い、3次元設計データを活用して、建設機械を自動制御または

部分的な自動制御により施工を実施し、再びドローンなどを使って3次元で出来形を検査するといった、3次元データとICTを全面的に活用する工事である。さらに、国土交通省は、インフラ分野のDX推進本部を2020年に立ち上げ、インフラ分野におけるデータとデジタル技術の活用を進めているが、この中でも建設機械の自動化について議論が進められている⁴⁾。

ICTを活用した自動施工に関する具体的な技術の例としては、鹿島建設が、CSG (Cemented Sand and Gravel) ダムの建設に対し、ダンプトラック、ブルドーザー、振動ローラーの自動化を行い、自動建設の試行施工を試みている⁹⁾。建設現場の自動化という意味では、世界的に見ても、この工事が自動施工のフロントランナーであると言える。また、マシンガイダンス (MG)、マシンコントロール (MC) 技術の、現場への導入も進んでいる。MGとは、建設機械の位置・姿勢をRTK-GNSSやIMU (Inertial Measurement Unit) 等で精度良く取得すると共に、その位置・姿勢と3次元の施工図をオペレーターに提示することで、丁張りや水系を必要とせずとも、工事を実施することができる技術である。MCは、MGで取得した建設機械の位置・姿勢ならびに、施工図面に応じて、建設機械の作業機の一部を自動制御することで、オペレーターの作業負担を低減できる。これらの技術は、近年、実施工にも積極的に利用され始めている。

また、建設機械の自動化に関連し、アカデミアでは、2018年10月に、ゼネコンやコンサルタント会社からの寄付を得て、i-Constructionを推進する技術ならびに技術者を育成することを目的とし、東京大学大学院工学系研究科に「i-Construction システム学」寄付講座が設置された¹⁰⁾。コマツは、大阪大学内に、コマツみらい建機協働研究所を設置し¹¹⁾、コベルコも、広島大学内にコベルコ建機夢源力共創研究所を設置した¹²⁾。このように、建設機械の自動化に向けた研究開発については、大学と企業が共同で進める産学連携が生まれつつある。さらに、内閣府を中心に、さまざまな研究開発やプロジェクトがスタートした。例えば、2020年にスタートした内閣府 Moonshot型研究開発のプロジェクトでは、目標3の中の「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」というプロジェクトで、複数台の小型建設ロボットの協働作業によるインフラ構築の自動化に関する研究開発が、現在も進められている¹³⁾。

インフラ点検に関する自動化に関する研究開発については、2014年以降、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)¹⁴⁾ や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)¹⁵⁾ が主導した研究開発が行われると共に、国土交通省がトンネルや橋梁といった点検対象となる試行現場を提供するなど、省庁間連携による実用化研究も強力に進められ、一部は、実用段階に達している。例えば、東急建設が進めてきたトンネル全断面点検・診断システム「iTOREL: アイトーレル」は、SIPの終了後も継続して現場試行を実施し、実用化を進めている¹⁶⁾。また、ドローン技術を用いた橋梁点検やトンネル点検については、足場を組まずに近接目視を行うことが可能であるため、大変期待されている。ドローンを用いた橋梁点検については、SIPでも多くの研究開発が行われたが、現在は、ドローン空撮を活用した橋梁点検調書の作成支援を行う業務を実施している業者も存在する。さらに、AIを用いたコンクリートのひび割れ検知なども開発が進み、さまざまな技術がインフラ点検に導入されつつある。しかしながら、ここ数年は、インフラ点検に関する大型プロジェクトは実施されていない。

海外に目を向けると、ヨーロッパでは、建設機械の自動化やインフラ点検に関する産学連携のプロジェクトが複数立ち上がっている。英国ケンブリッジ大学では、Digital Road/Future Road¹⁷⁾ というプロジェクトが立ち上がり、産学連携で、道路建設や点検に関する新たな研究開発を進める動きが出てきている。また、フィンランドでも、複数建設機械の自動化に関する産学連携のプロジェクトが複数進められている¹⁸⁾。建設機械については、各社が自動化技術の向上を競っているが、近年は、Carbon Freeに対する取り組みが目立っている。例えば、2022年のBaumaという建設・建築産業用機械の見本市 (2022年10月ミュンヘン) では、多くの建設機械会社から最新の電動化建機の発表が行われた。この例からも分かる通り、建設機械のMC、MGや自動化と共に、電動化に関する研究開発が進められている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

近年、土工を対象とするアカデミアが貢献するロボット技術としては、複数の研究開発チームが、土質を考慮した研究開発を進めている。スイスETHのHutterのグループは、シミュレーション環境において、建設ロボットによるさまざまな条件下での掘削動作を行わせることで掘削に関する学習を行わせ、この学習結果を元に、土質を考慮した掘削用の建設ロボットの制御を実現するAI技術を開発した¹⁹⁾。これは、建設機械の油圧の圧力や建設機械の姿勢をセンサー情報として検知し、シミュレーターで学習した情報と比較することで地盤強度を推定して、その地盤強度に応じた掘削動作を生成するものである。これにより、これまでの自動化では、土質にかかわらず、決められた動作による自動掘削を実現していたものが、土質に応じた掘削動作を生成し、最適な掘削を実現することが期待できる。また、東京大学の永谷のグループでは、3次元計測を行うことが可能なセンサーを用いて、油圧ショベルの掘削作業を観察することによる土質推定を行う手法を提案した。この推定結果を元に、土質に応じた最適掘削動作をあらかじめ生成しておくことで、実機によるエネルギー効率の高い掘削動作を実現した²⁰⁾。この技術は実建設機械に実装され、作業中の建設機械の燃料計を観察することで、この技術の有用性が確認された。現在、ゼネコン各社においても、全自動施工を目指した研究開発を進めるにあたり、掘削において、単に油圧ショベルの刃先の位置制御を正確に行えれば良い、という方針ではなく、地盤強度に応じてどのような動作で掘削するか、といった点について議論を始めている。

一方、研究開発を進めるためのプラットフォームについて関する新展開として、国立研究開発法人土木研究所は、ハードウェアを抽象化し、基礎的なルールならびに、データの定義や構造を共通化した、建設機械向け標準プラットフォーム OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy) を提案し、実装を進めている²¹⁾。これまで、ゼネコンや建設機械メーカー、測量機器メーカーらがのおのチームを作り、それぞれ独自に、建設機械の自動化に関する研究開発を進めてきたが、異なるメーカー間でのセンサーの相互利用は基本的に不可能であり、ソフトウェアやシステムの再利用性も乏しいという問題があった。このプラットフォームにより、今後、大学の研究機関やベンチャー企業なども、建設機械の自動化に関する研究開発に容易に参入できるようになり、本分野の研究開発が活性化することが期待できる。

一方、橋梁やトンネル点検に関するアカデミアが貢献するロボット技術についても、近年、AIを用いた点検や診断に関する研究開発が取り入れられている。例えば、東京大学の全のグループでは、ディープラーニングを用いて各損傷を検出し、Structure from Motionを用いて局所的な位置情報を取得し、その位置情報を橋梁全体の3Dデータに統合する手法を提案している²²⁾。

もう一点、忘れてならないのが、本研究分野へのCarbon Freeの影響である。先にも述べた通り、Bauma2022では、多くの企業がCarbon Freeを掲げて建設機械の電動化に関する展示を行った。電動化 = Carbon Freeという点については、議論の余地もあるが、ヨーロッパの土工分野に関する研究開発プロジェクトでも、Carbon Freeを銘打ったテーマが多く見受けられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

2020年にスタートした内閣府Moonshot型研究開発のプロジェクトでは、目標3の中の「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働AIロボット」というプロジェクト内で、複数台の小型建設ロボットの協働作業によるインフラ構築の自動化に関する研究開発が進められている¹³⁾。このプロジェクトは、「変動する多様な環境においても動作を可能とする」という点が特徴である。具体的な研究開発項目として、土工を革新するハードウェアの研究開発、複数台ロボットの協調アルゴリズム、地盤情報を含む現場の情報を収集するセンシング技術が挙げられ、最終的にこれらの要素技術を統合することで、自動インフラ構築を実現する建設ロボット群の実現を目指している。

フィンランド、オウル大学のHeikkiläらのプロジェクト「Autonomous Low-Emission Swarm of Infra Construction Machinery project」でも、産学協同で、複数建設ロボットによるインフラ構築に関する実

証研究開発が進められている¹⁸⁾。ここでは、油圧ショベル、ダンプトラック、ブルドーザー、振動ローラーなどの異種ロボットの協調動作により、自動でインフラ構築を進めるシステム構築を目指している。タイトルにもあるように、複数台建設ロボットの協働作業の研究のみならず、Low-Emissionというキーワードがタイトルに入っているところも特徴である。建設機械に対するLow-EmissionやCarbon Freeに対する需要は、日本にも来ていると考えられる。

スイスETHのHutterらは、Autonomous Walking Excavatorに関する研究開発を進めている^{19), 23)}。利用している建設機械は、脚の姿勢を変更することが可能な特殊な建設機械 (Menzi Muck社製スパイダー) で、この筐体を用いた掘削に関する適応制御や不整地走行制御などの研究を進めてきた。近年は、この筐体1台を用いた公園の造成工事を全自動で実現し、注目を集めている。

インフラ点検については、SIPプロジェクト第1期で実施されたインフラ点検のプロジェクトが2018年度末で終了となったが、官民研究開発投資拡大プログラムにて、これらの技術に関する研究開発が進められている。さらに、2022年には、次期SIP課題候補として、「スマートインフラマネジメントシステムの構築」という課題名のFSがスタートした。今後、SIP第3期では、同課題名のプロジェクトがスタートすると期待される。

(5) 科学技術的課題：

本分野における科学技術的課題については、対象となる環境が屋外自然環境である点、不確定の地盤を扱うことが多い点から、屋内環境で培ったロボット工学の基礎技術が、そのままでは屋外環境で適用困難となることも少なくない。これらを踏まえ、以下に、今後インフラ保守・建設ロボットに必要と考えられる技術的課題について列挙する。

(1) 建設機械における移動技術については、対象とする環境が不整地または軟弱地盤であることから、建設機械の走破性能 (トラフィカビリティ) の検証ならびに、走行性能の向上が重要となる。軟弱地盤については、テラメカニクス²⁴⁾ をベースとした研究が、建設機械に対しても進められてきたが、現実の環境は地盤が均一であるといったテラメカニクスに必要となる条件を満たすことが不可能であるため、実問題に対して、直接適用することが困難と言われている。また、走行性能の検証には、土質パラメータの取得が重要となるが、これを非接触で計測する手段も未解決の問題である。

(2) 建設機械やドローンの位置推定については、基本的にはGNSSで行うものが多い。RTK-GNSS技術により、センチメートル単位で位置推定ができるようになったため、この技術が広く利用されるようになった。さらに近年、GNSSデバイスの価格も低下し、利用しやすくなった。しかしながら、谷間で行う土木施工や橋梁点検などのアプリケーションでは、衛星からの信号が遮られるため、GNSSによる位置推定を行うことが困難な場合がある。これを解決するための手法として、レーザー距離センサーや画像を用いた位置推定技術 (SLAM: Simultaneously Localization And Mapping)²⁵⁾ を利用したさまざまな方法が提案されている。この手法を用いて自然地形や特徴量の少ない橋梁/トンネルにおける位置推定を行うことは、環境によっては困難である。今後、位置推定技術の頑強性に関する研究の進展が期待される。

(3) 今後の自動施工について考えると、建設機械単体を自動化するのみならず、複数台の建設機械をどう協調させていくかが重要な課題になると考えられる。また、施工図面が与えられた際、どのような段取りで各建設機械を動作させるか?という施工計画についても自動化が期待される。この分野の研究開発を実現するためには、地盤、設計、施工、動作計画、制御、センシングなど、さまざまな研究分野の知見を結集する必要があり、今後の研究開発が期待される。

(4) インフラ保守・建設ロボットは、数多くのセンサーや駆動系を必要とする規模の大きいロボットシステム

となるが、現状では、ゼネコンや建機メーカーが対面で組み、開発が行われているため、開発効率が低いという問題や、複数社の建設機械を同時に制御することができないといった問題が存在する。先に述べた通り、土木研究所では、これを解決するためのプラットフォーム OPERA を提案している²¹⁾。このような、協調領域の研究開発に関する研究開発も、今後広く求められる。

(6) その他の課題

(1) 無人移動体を利用できる無線帯域の確保

ロボットとオペレーター間の無線通信を安定して確保することは、インフラ保守・建設ロボットの分野を進めていく上で必要不可欠である。しかしながら、現状では、通信距離の問題、通信遅延の問題、複雑な自然地形での遮蔽（しゃへい）物による通信遮断の問題などが存在し、これらが問題とならない範囲でのみ、実用化が図られてきた。無線通信については、通信帯域の確保の問題も含むため、政策的課題の側面もあるが、5Gの活用を含め²⁶⁾、今後、ハード面、ソフト面共に、通信に関する目覚ましい技術革新を起こすことができれば、インフラ保守・建設ロボットの適用範囲が大きく広がる可能性がある。なお、移動体の通信技術については、通信帯域確保ならびに、通信出力の上限に関する問題が存在する。なお、国土の狭い日本では、無線通信の干渉をできる限り低減するため、無線通信に利用可能な通信出力が抑えられている。また、災害時などの非常時に占有可能な通信帯域も確保できていなかった。そこで、2016年8月、総務省は、移動体を対象とした5.7GHz帯、2.4GHz帯、169MHz帯の無人移動体用無線通信を可能とするように、電波法施行規則が改正された²⁷⁾。今後も、ロボットの活用において、無人移動体を利用しやすい無線帯域の確保が必要となると考えられる。そのための法整備ならびに、非常時におけるルールの策定など、総務省の対応が期待される。

(2) 建設機械施工の自動化・自律化に関する安全基準の策定

また、自動化・自律化を行った建設施工技術を現場に試験導入する際、現状では、安全や開発面での統一的な基準がないため、現場ごとの安全対応となっている。これにより、効率的な開発が阻害されているというのが現状である。このような状況において、国土交通省は、2022年、自動化・自律化・遠隔化技術について、現場状況を踏まえた適切な安全対策や関連基準の整備等により開発および普及を加速化させるため、関係する業界、行政機関および有識者からなる分野横断的な「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を設置した。この協議会において、現在、安全に関するルールの設定や自動化目標の設定等が議論されている。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	不整地移動に関する基礎研究、掘削効率に関する基礎研究については、全般に継続して成果が出ていると見受けられる。(国内会議：日本ロボット学会学術講演会や建設ロボットシンポジウム等にて、さまざまな基礎研究や応用研究の発表あり。)
	応用研究・開発	◎	↗	インフラ点検ロボットや建設ロボットの応用研究や実用化については、継続して成果が出ている。(国内会議：日本ロボット学会学術講演会や建設ロボットシンポジウム等にて、さまざまな基礎研究や応用研究の発表あり。)ゼネコン各社は、それぞれ、建設機械の自動化に関する提案を行っている。
米国	基礎研究	○	→	不整地の走行に関する基礎研究では、特にカーネギーメロン大学やMITが、継続して高い成果を挙げている。建設ロボットに関する基礎研究は、米国からは、それほど多くないという印象。(International Symposium on Automation and Robotics in Construction など)

	応用研究・開発	◎	→	ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等（またはそれ以上）に実用化が進められている。インフラ点検を含むドローンを用いたビジネスは多数あり、そのビジネスの中でも技術開発が大きく進んでいる。
欧州	基礎研究	○	→	遠隔操作の臨場感に関する基礎研究や掘削に関する基礎研究において、大学や研究機関で、研究開発が進められている。（IROS等の国際会議など）
	応用研究・開発	◎	→	ブルドーザー、グレーダー、油圧ショベルなどの自動制御の建設機械については、日本と同等に実用化が進められている。特に、フィンランドやスウェーデンなどにおいて、マシンコントロールを用いた実施工が数多く実施されている。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発	○	→	あまり情報が入ってこないが、Web上の記事によると、鉱山や建設現場における自動化の研究開発が進められている。また、Bauma2022にも、中国から、多くの企業が出展を行っていた。
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発	△	→	あまり情報が入ってこないが、Web上の記事によると、建設現場における無人化・自動化の研究開発が進められている。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会「建設業ハンドブック2021」https://www.nikkenren.com/publication/pdf/handbook_2021.pdf, (2023年2月21日アクセス)。
- 2) 国土交通省「ICTの全面的な活用：i-Construction」https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html, (2023年2月21日アクセス)。
- 3) 建山和由, 横山隆明「ICTを利用した建設施工の高度化と将来展望」『計測と制御』55巻6号(2016): 477-482., <https://doi.org/10.11499/sicejl.55.477>.
- 4) 国土交通省「インフラ分野のDX」https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000073.html, (2023年2月21日アクセス)。
- 5) Keiji Nagatani and Yozo Fujino, “Research and Development on Robotic Technologies for Infrastructure Maintenance,” *Journal of Robotics and Mechatronics* 31, no. 6 (2019) : 744-751., <https://doi.org/10.20965/jrm.2019.p0744>.
- 6) 国土交通省道路局 国道・技術課「道路トンネル定期点検要領（平成31年3月）」国土交通省, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_9.pdf, (2023年2月21日アクセス)。
- 7) 国土交通省道路局「道路橋定期点検要領（平成31年2月）」国土交通省, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf, (2023年2月21日アクセス)。
- 8) 情報化施工推進会議「情報化施工推進戦略:「使う」から「活かす」へ、新たな建設生産の段階へ挑む!!

- (平成25年3月29日) 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/common/000993270.pdf>, (2023年2月21日アクセス) .
- 9) 浜本研一, 三浦悟, 出石陽一「次世代建設施工システムによるダム建設とシステム制御の役割」『計測と制御』61巻9号(2022): 671-675., <https://doi.org/10.11499/sicejl.61.671>.
 - 10) 小澤一雅「東京大学「i-Constructionシステム学」寄付講座における取り組み」『建設マネジメント技術』493号(2019): 61-64.
 - 11) 大島陽二郎「大阪大学 コマツみらい建機協働研究所」『システム/制御/情報』64巻3号(2020): 111-113., https://doi.org/10.11509/isciesci.64.3_111.
 - 12) 広島大学「コベルコ建機夢源力共創研究所」<https://www.dream-driven.hiroshima-u.ac.jp>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 13) Keiji Nagatani, et al., “Innovative technologies for infrastructure construction and maintenance through collaborative robots based on an open design approach,” *Advanced Robotics* 35, no. 11 (2021): 715-722., <https://doi.org/10.1080/01691864.2021.1929471>.
 - 14) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」国立研究開発法人科学技術振興機構, https://www.jst.go.jp/sip/k07_kadai_dl.html, (2023年2月21日アクセス) .
 - 15) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ロボット・AI部「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100871665.pdf>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 16) 中村聡, 井上大輔, 伊藤正憲「変状自動検出技術を適用したトンネル点検システム「iTOREL」の開発」『電力土木』416号(2021): 95-97.
 - 17) University of Cambridge, “Digital Roads of the Future,” <https://drf.eng.cam.ac.uk>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 18) University of Oulu, “University of Oulu is researching autonomous infra construction machinery swarm,” <https://www.oulu.fi/en/news/university-oulu-researching-autonomous-infra-construction-machinery-swarm>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 19) Pascal Egli, et al., “Soil-Adaptive Excavation Using Reinforcement Learning,” *IEEE Robotics and Automation Letters* 7, no. 4 (2022): 9778-9785., <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3189834>.
 - 20) Shinya Katsuma, et al., “Excavation Path Generation for Autonomous Excavator Considering Bulking Factor of Soil,” in *2020 Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)* (IAARC, 2020), 578-583., <https://doi.org/10.22260/ISARC2020/0080>.
 - 21) 鈴木裕敬, 他「自律施工技術開発促進に向けた土木研究所の取り組み」『計測と制御』61巻9号(2022): 651-655., <https://doi.org/10.11499/sicejl.61.651>.
 - 22) Tatsuro Yamane, Pang-jo Chun and Riki Honda, “Detecting and localising damage based on image recognition and structure from motion, and reflecting it in a 3D bridge model,” *Structure and Infrastructure Engineering* (2022)., <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2131845>.
 - 23) Dominic Jud, et al., “HEAP - The autonomous walking excavator,” *Automation in Construction* 129 (2021): 103783., <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103783>.
 - 24) Jo Yung Wong, *Theory of Ground Vehicles*, 4th ed. (John Wiley & Sons. Inc., 2008).
 - 25) Josep Aulinas, et al., “The SLAM problem: a survey,” *CCIA* 184, no. 1 (2008): 363-371.

- 26) 青木浩章, 他「O1-2 次世代通信規格 (5G) を用いたクローラダンプの自動走行システムのフィールド検証: 建設現場における可搬型5Gの活用」第19回建設ロボットシンポジウム (2019年10月9-11日), <https://ccrr.jp/event/symposium/2019/2019.html>, (2023年2月21日アクセス) .
- 27) 総務省 総合通信基盤局電波部移動通信課「ロボット・IoTにおける電波利用の高度化など最新の電波政策について (平成28年6月17日)」一般社団法人九州テレコム振興センター (KIAI), <http://kiai.gr.jp/jigyuu/h28/PDF/0617p1.pdf>, (2023年2月21日アクセス) .

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ロボティクス